

Les défis de la mobilité durable pour l'automobile

Alors que les constructeurs d'automobiles opèrent des changements profonds pour répondre aux défis de la globalisation et des évolutions sociétales, la question basique de l'énergie et des technologies de traction automobile devient primordiale et stratégique.

Les hydrocarbures non conventionnels s'inscrivent dans la continuité des motorisations thermiques. Ils sont une opportunité renforçant la dynamique vers plus de sobriété énergétique. Mais comment seront-ils associés aux technologies électriques de rupture ? Le paysage dépendra très largement de la capacité de tous les acteurs à coopérer en vue d'une mobilité plus durable.

Par Teresina MARTINET* et Pierre MACAUDIÈRE**

Introduction

Dans les toutes premières phases du développement des automobiles, trois modes de propulsion différents ont été mis en œuvre, parfois en parallèle avec, dans l'ordre d'apparition, la vapeur, l'électricité, puis les carburants hydrocarbonés. Ainsi, en 1900, sur environ 4 200 véhicules fabriqués aux Etats-Unis, 38 % étaient électriques et 40 % étaient à vapeur (contre seulement 22 % de véhicules à essence [1]).

Mais la mobilité individuelle ne s'est développée massivement, au cours du XX^e siècle, qu'en raison de l'émergence d'une source d'énergie longtemps considérée comme inépuisable, le pétrole, dont les produits dérivés rassemblent toutes les propriétés requises pour une utilisation optimale dans le domaine du transport :

- ✓ une forte densité énergétique : avec moins de 100 litres, il est possible de transporter cinq personnes sur plus de 1 000 km. En outre, moins de cinq minutes suffisent pour remplir le réservoir et redonner ainsi au véhicule son autonomie initiale... ;
- ✓ une grande facilité de manipulation et de stockage (il s'agit de liquides, dans les conditions normales d'usage) ayant permis la mise en place d'un réseau de distribution dense et réparti sur tout le territoire ;
- ✓ un coût global de la mobilité qui, en dépit de la hausse des prix de l'énergie, reste accessible pour un grand nombre de personnes et se positionne favorablement par rapport aux transports en commun, pour de nombreux usages.

Les automobiles équipées de moteurs à explosion alimentés à l'essence ou au gazole ont ainsi supplanté toutes les autres solutions techniques : le véhicule à vapeur (rapport

poids/puissance trop défavorable) et le véhicule électrique, dont les handicaps intrinsèques (faible autonomie, lenteur de remplissage) ne permettaient pas d'envisager un déploiement rapide à grande échelle.

L'accroissement immense des besoins de mobilité, en particulier automobile, inhérent au développement économique des pays émergents, exige de résoudre de nouveaux problèmes techniques, économiques et sociétaux. Si l'adoption de comportements plus responsables est naturellement l'une des clefs pour assurer ce développement, les besoins des clients comportent des invariants qu'il faut continuer de prendre en compte. En Europe, par exemple, 75 % des déplacements sont effectués en voiture. La substitution totale d'autres modes de transport au véhicule individuel ne constitue pas une solution. Nous n'aborderons pas davantage ce sujet ici, car il s'agit d'un volet transversal aux technologies utilisées. De même, on ne traitera pas ici de la création de nouveaux services de mobilité individuelle, parfois liés aux nouvelles technologies et impliquant directement les constructeurs.

Dans un tel contexte de prise de conscience accrue des limites environnementales et des limites en ressources de la planète, dont le pétrole est un symbole majeur, la question des sources d'énergie et celle des technologies de traction associées sont donc clairement posées.

Le facteur 2 au niveau mondial, ou 4 pour les pays développés, même s'il est très débattu, résume la baisse vertigineuse attendue à l'horizon 2050 pour les émissions de CO₂, ainsi que pour les consommations d'énergie. Ces chiffres montrent l'ampleur du défi pour l'automobile, dont les objectifs d'émissions de CO₂ et de consommations unitaires convergent au niveau mondial dès l'horizon 2020.

La période 2020-2030 sera l'horizon des développements qui vont suivre. Nous rappellerons tout d'abord les déterminants des évolutions passées de l'automobile, puis nous traiterons de la place des hydrocarbures non conventionnels dans les nouvelles approches.

Vers une mobilité durable

L'efficacité énergétique d'abord

Les critères d'optimisation des véhicules ont été traditionnellement centrés sur une amélioration de la performance technique (puissance, agrément, sécurité...) et de la performance économique (coût à l'usage, dont réduction de la consommation, maintenance, durabilité, pannes...).

L'efficacité énergétique des automobiles a guidé les efforts des constructeurs, ne serait-ce que pour compenser l'alourdissement des véhicules généré par l'amélioration du confort et de la protection des passagers en cas d'accident.

Certains de ces gains sont présentés dans le tableau 1 ci-dessous, qui rassemble l'évolution comparative de la consommation, de la puissance et de la masse d'un véhicule Essence ou Diesel du segment C (« compactes ») au cours des vingt dernières années. Retenons simplement qu'en vingt ans, la masse des véhicules et la puissance des moteurs ont augmenté d'environ 30 %, alors même que la consommation était réduite d'environ 30 %.

Et, pour l'histoire, n'oublions pas la Panhard & Levassor de 1908 qui développait 22 chevaux-vapeur avec un moteur 4 cylindres de 4 084 cm³. La diminution de la cylindrée a été, depuis lors, un levier puissant de l'amélioration des performances en Europe.

Les constructeurs européens ont également su utiliser les atouts du gazole, qui permet de meilleurs rendements du moteur et des émissions de CO₂ plus faibles de 20 % par rapport à l'essence. La fiscalité des carburants a permis et accompagné ce mouvement.

La réduction des émissions polluantes

Les premiers critères réglementaires de mobilité durable ont cependant concerné les émissions de polluants, qui impactent directement ou indirectement la santé des usagers ou des riverains.

Cette pollution, dite locale, résulte de la combustion incomplète du carburant dans la chambre de combustion du moteur des véhicules. Sont alors rejetés dans l'atmosphère du monoxyde de carbone (CO), des hydrocarbures imbrûlés (HC), des oxydes d'azote (NOx) ou encore des particules de suie, en plus du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau.

A la fin des années 1980, les Etats-Unis et l'Union européenne ont adopté des règlements limitant les rejets automobiles. Ces normes d'émissions (connues sous le nom d'EuroX en Europe (X égale 0, 1, 2... 6) ont permis de réduire de plus de 90 % l'ensemble des polluants, ainsi que le montrent la figure 1 (pour l'essence) et la figure 2 (pour le diesel). Depuis fin 2009, la norme Euro5 est en vigueur en Europe.

C'est une coopération entre l'industrie automobile et l'industrie pétrolière, dont le travail de fond a permis d'améliorer la qualité des carburants (composition, indice d'octane « recherche », cétane, teneur en soufre...), qui a rendu possible le développement de modes de combustion optimisés et l'utilisation de systèmes de dépollution avancés (catalyseurs TWC essence ou d'oxydation Diesel, filtres à particules) permettant de réduire les polluants.

Des normes plus récentes sur les consommations unitaires et les émissions de CO₂

Plus récemment, la claire perception de la raréfaction des ressources pétrolières conventionnelles et le réchauffement climatique ont constitué deux critères additionnels de durabilité, au départ distincts :

S'agissant du premier critère, de nombreux experts s'accordent sur une production plafonnant autour de 100

Modèles Essence		ZX	Xsara	C4	C4	New C4
Année		1991	2000	2004	2007	2010
Consommation	l/100 km	9,1	7,7	7,6	6,7	6,7
Puissance	kW	87	99	103	110	115
Masse	kg	935	1110	1195	1195	1250

Modèles Diesel		ZX	Xsara	C4	C4	New C4
Année		1991	2000	2004	2007	2010
Consommation	l/100 km	6,7	5,4	4,8	4,5	4,5
Puissance	kW	64	66	80	80	80
Masse	kg	1020	1159	1246	1246	1277

Tableau 1 : Evolution de la consommation, de la puissance et de la masse d'un véhicule du segment C au cours des 20 dernières années.

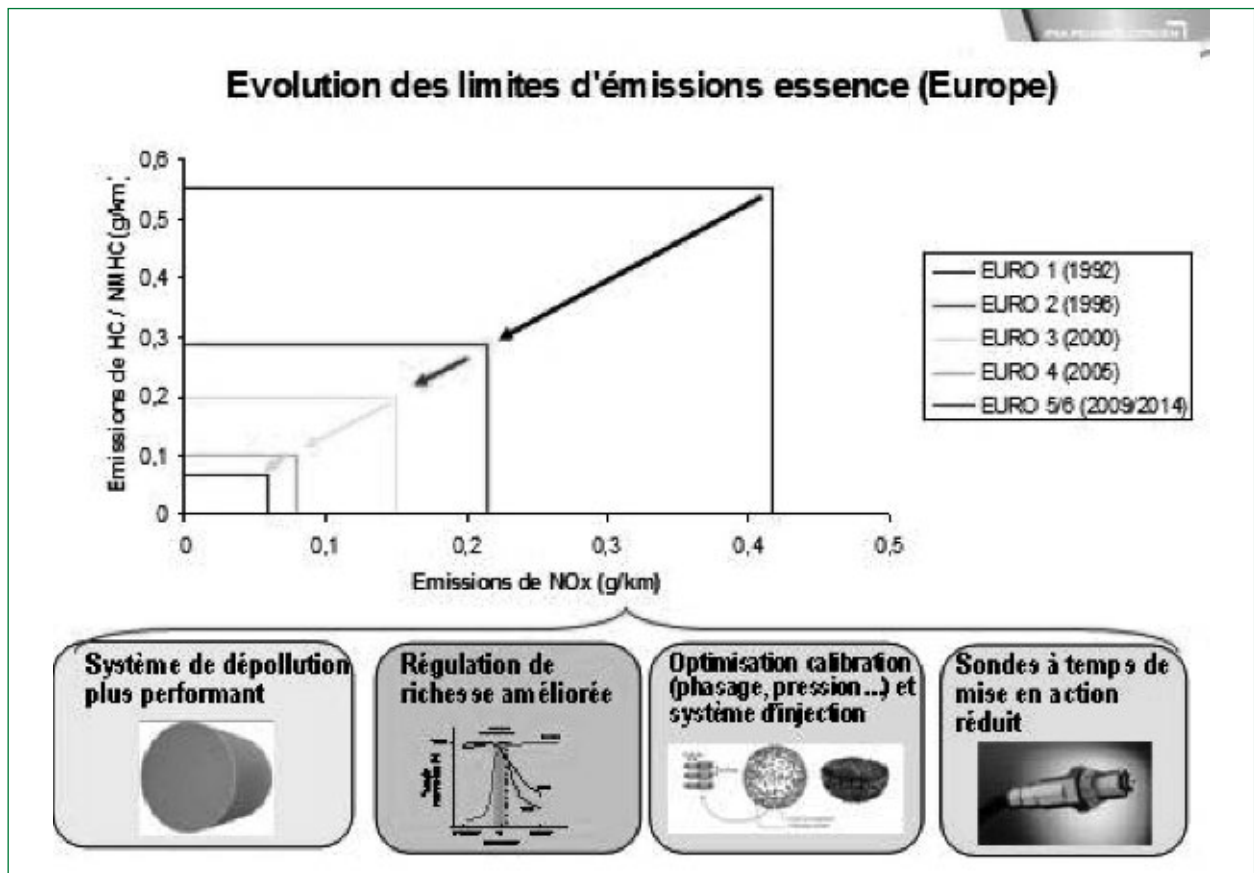


Figure 1 : Évolution des limites d'émission essence de NOx et d'HC

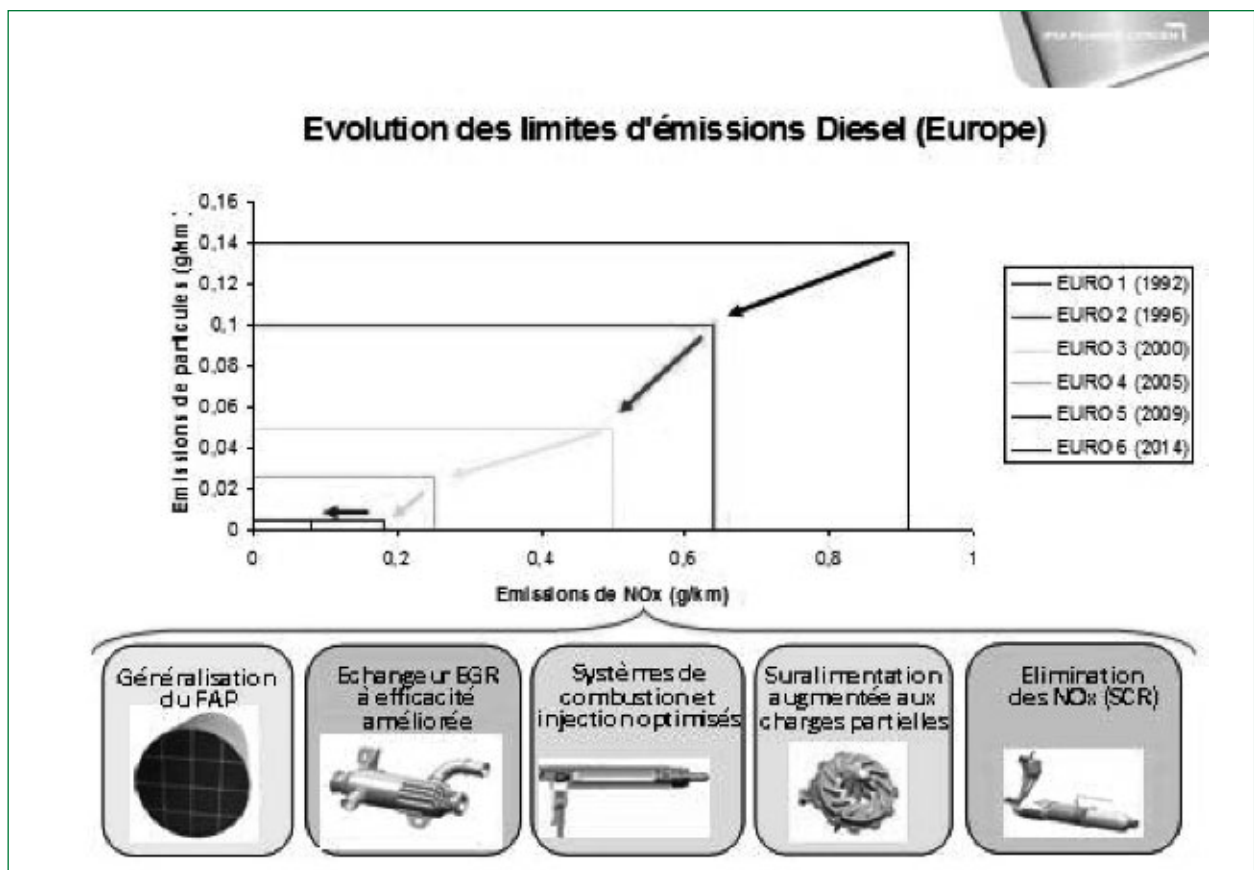


Figure 2 : Évolution des limites d'émission Diesel de NOx et de particules.

Mbl/j (millions de barils par jour) à l'horizon 2020-2030, soit un niveau un peu plus élevé que le niveau actuel (proche de 86 Mbl/j). L'exploitation de ressources non conventionnelles, d'une accessibilité plus délicate, se traduira par un prix plus élevé, mais sans nécessairement de conséquence directe en termes de rupture technique.

Le parc de véhicules en circulation devrait doubler d'ici à 2030 pour atteindre 1 600 millions de véhicules : cela renforcera la pénurie, et donc le besoin de réduire la consommation unitaire de chaque véhicule.

Comme le transport dépend à plus de 98 % du pétrole et « brûle » environ 60 % de l'offre de cette ressource, une mobilité individuelle plus durable passe par :

- ✓ le développement de *véhicules à basse consommation*, notamment dans un contexte où *le prix de cette énergie s'envole* ;
- ✓ *l'utilisation de carburants alternatifs* au pétrole (gaz, biocarburants...), dès lors que leur usage reste économiquement accessible.

Le **second critère** est la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Le CO₂, en raison de son potentiel de réchauffement, joue un rôle important sur l'évolution du climat. Selon le GIEC, le CO₂ lié à l'usage d'énergies fossiles constitue 60 % du problème. L'automobile, qui en est responsable, aujourd'hui, à hauteur de 10 %, doit contribuer à la maîtrise de ces émissions.

Cette pollution globale (car elle est ressentie sur l'ensemble de la planète) est sans impact direct sur la santé des usagers ou des riverains. Pour répondre à ce second critère de réduction des émissions de CO₂, deux approches, heureusement cohérentes avec celles résultant du premier critère, s'imposent :

- ✓ Le développement de *véhicules à basse consommation*. Les émissions de CO₂ en grammes par kilomètre étant directement proportionnelles à la quantité de carburant brûlée, il n'est d'autre solution que de renforcer la réduction de la consommation des véhicules automobiles. C'est un enjeu majeur pour la compétitivité des constructeurs. L'Europe a adopté un règlement [2] ambitieux qui impose les niveaux à atteindre à l'échéance de 2012/2015 (130 g de CO₂/km) et à l'échéance de 2020 (95 g/km) en matière d'émissions moyennes des véhicules neufs vendus (*Corporate Average Fuel Economy* ou CAFE, voir la figure 3). A plus long terme (2050), un objectif parfois avancé viserait une division par quatre des émissions actuelles, soit une cible voisine de 35 g/km, ce qui représente une consommation de carburant proche de 1,45 l/100 km pour l'essence, et de 1,32 l/100km, pour le diesel ;

- ✓ *L'utilisation d'énergies alternatives permettant d'émettre moins de CO₂*, mais, cette fois, sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule (de ce fait, certains carburants non conventionnels d'origine fossile peuvent ainsi rester eux aussi intéressants).

Les réponses techniques à cette mobilité durable à horizon 2020-2030

Les différentes solutions techniques seront principalement analysées au regard de trois paramètres : l'efficacité énergétique, les émissions de CO₂ sur le cycle de vie et le coût (TCO : *Total Cost of Ownership*, supposé représenter la rareté de la ressource, à travers le prix de l'énergie correspondante).

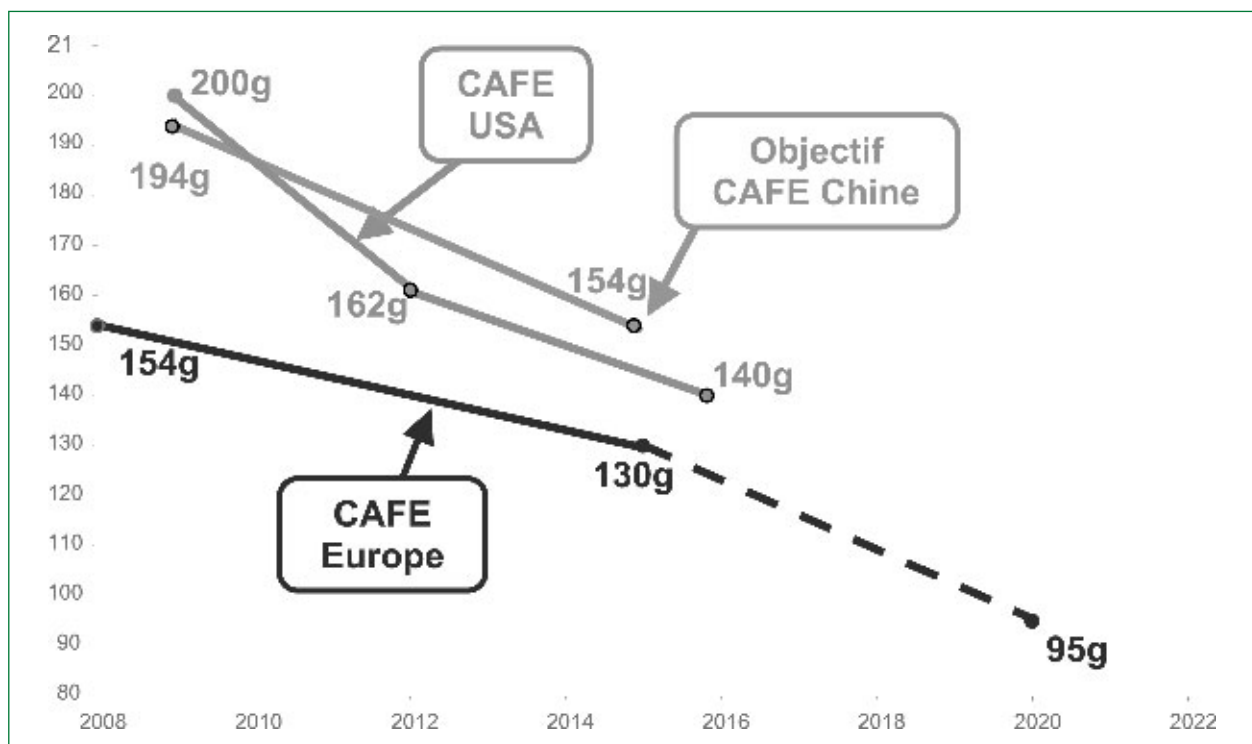


Figure 3 : Évolution des émissions de CO₂ moyennes attendues par zone.

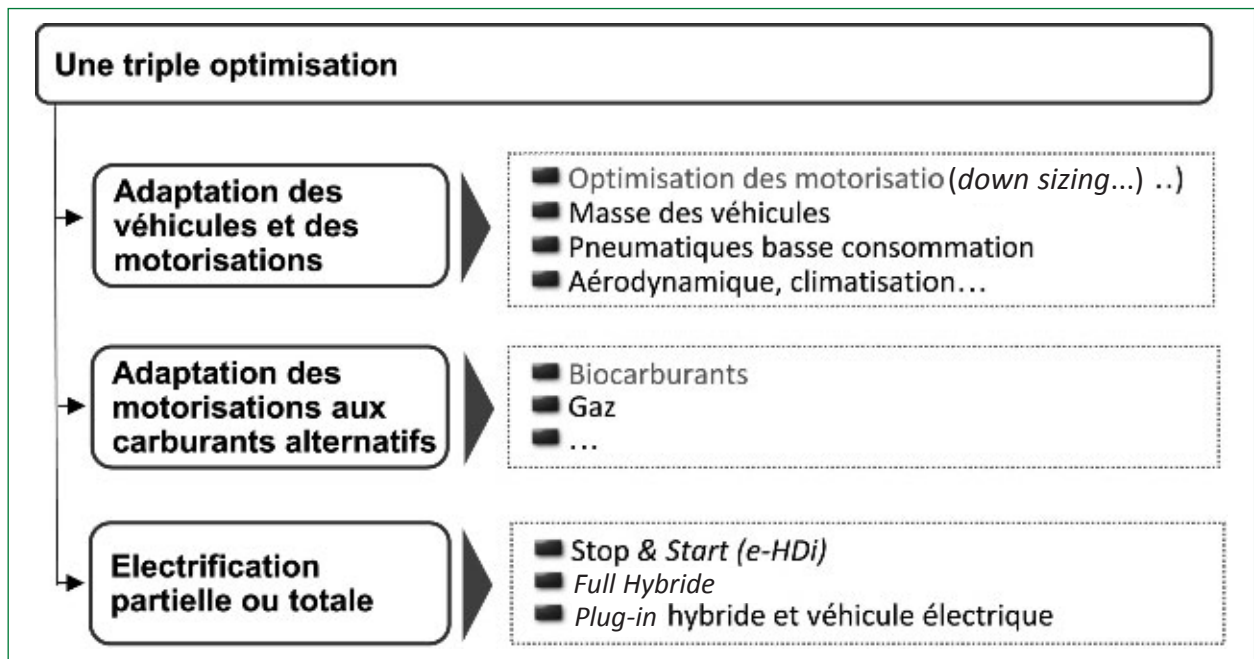


Figure 4 : Les trois axes d'optimisation synergétiques pour réduire les émissions de CO₂.

Trois des principaux axes de travail sont présentés à la figure 4.

Le premier axe concerne l'adaptation des véhicules et/ou des motorisations pour réduire la consommation, via l'optimisation de l'efficacité énergétique globale. La réduction des besoins en énergie du véhicule constitue une action prioritaire : allègement de la masse, aérodynamisme et pneus basse consommation. L'augmentation des rendements du groupe motopropulseur passe en particulier par l'amélioration de la combustion, avec notamment la réduction de la cylindrée des moteurs, accompagnée d'un accroissement de la puissance spécifique (encore appelée *downsizing*), ou encore l'introduction de technologies vertueuses, comme le traitement des NOx par réduction sélective à l'urée (SCR, pour le diesel) qui apporte jusqu'à 5 % de gain de consommation.

Le deuxième axe concerne l'électrification partielle (hybrides, hybrides rechargeables, ou *plug-in hybrid*) ou totale (véhicules électriques, *range extenders*) de la chaîne de traction.

L'hybridation consiste à doter le véhicule de deux types de moteurs (le plus souvent, un moteur thermique et un moteur électrique) et donc de deux types de stockage d'énergie (un réservoir classique et une batterie). Le principal avantage de l'hybridation réside en la possibilité, dans le cadre de trajets urbains ou périurbains, de récupérer lors des freinages une partie de l'énergie cinétique qu'il avait fallu dépenser pour mettre le véhicule en mouvement.

L'hybride rechargeable, grâce à une augmentation de la capacité des batteries, confère au véhicule la capacité de rouler en mode électrique sur la grande majorité des trajets urbains (on vise de l'ordre de 20 à 50 km d'autonomie électrique). Le moteur thermique assure alors principalement les trajets interurbains et « rassure » les usagers, qui

n'ont plus à redouter l'éventualité d'une panne d'électricité (batterie « à plat ») ! Les gains possibles se situent à environ 30 % des solutions thermiques, incluant le *Stop and Start*, dont la généralisation est d'ores et déjà engagée. Le déploiement des systèmes *Stop and Start* est un point commun aux axes 1 et 2, et une condition d'entrée pour l'hybridation.

Le développement massif du véhicule tout électrique (incluant l'usage d'hydrogène dans une pile à combustible) est toujours sujet à question sur le long terme. A moyen terme, le surcoût économique lié aux batteries et la faible adéquation avec les attentes de mobilité des usagers (autonomie, facilité de recharge...) devraient en limiter l'essor à des usages urbains ou spécifiques.

Les émissions de CO₂ dans une approche « du puits à la roue » dépendent très fortement du mode de production du pays considéré, ainsi que le montre la figure 5 (source AIE). Dans le cas d'un véhicule de type Peugeot 207 ou Citroën C3, on observe que la réduction de CO₂ peut dépasser 80 % par rapport à l'essence en France, avoisiner les 55 % en moyenne européenne mais être non significative, par exemple, en Chine, où la production d'électricité repose majoritairement sur le charbon. Cela illustre très clairement la nécessité, avec les énergies alternatives, de développer une approche « du puits à la roue » qui va devenir incontournable pour valider la pertinence des choix au regard du CO₂.

Tous les constructeurs automobiles travaillent à ces solutions (en la matière, la Chine fait montre d'une grande ambition). Les montants de R&D nécessaires sont considérables pour mettre au point ces technologies et en rendre le coût accessible. Les puissances publiques des Etats concernés sont souvent très présentes. L'Europe est à la recherche d'une politique plus active.

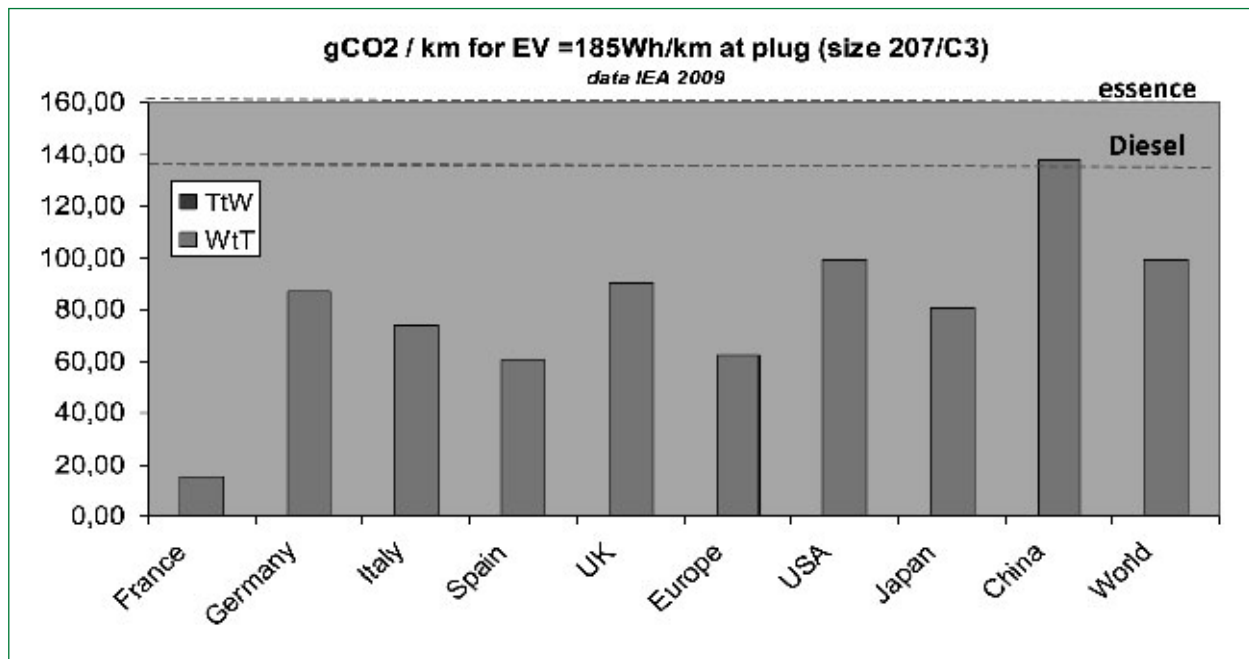


Figure 5 : Comparaison des émissions de CO₂ d'un véhicule électrique en fonction de l'origine de l'électricité utilisée (source AIE).

Pour sa part, PSA Peugeot Citroën déploie sa stratégie technologique sur les trois leviers techniques : réduction des consommations du véhicule, amélioration des rendements des moteurs thermiques et, enfin, électrification des véhicules. Peugeot et Citroën commercialisent des véhicules électriques urbains, et les premiers véhicules hybrides diesel vont sortir à l'automne 2011 (il s'agira de véhicules de moyenne gamme et de haut de gamme).

Le troisième axe concerne l'utilisation de carburants alternatifs, à deux conditions : constituer une alternative crédible au pétrole (production, bilan énergétique...) tout en réduisant de façon notable les rejets de CO₂.

S'agissant du gaz naturel (CH₄ ou méthane), son utilisation est déjà mise en œuvre sur de nombreux marchés. Mais nous pouvons le considérer comme un carburant alternatif, car il est, de fait, peu développé, et il peut être produit de manière alternative. Aujourd'hui, il s'agit d'une énergie principalement (1) fossile qui, à travers une adaptation bien maîtrisée des moteurs et du véhicule (pour le stockage), conduit à une réduction des émissions de CO₂, estimée à 20 % environ par rapport au moteur à essence (grâce à un rapport C/H favorable). Toutefois, un développement plus important est directement lié à la mise en place d'un réseau de distribution qui se justifie seulement dans certaines zones proches des régions de production. Utilisé dans le transport, il ne présente pas les avantages des sources liquides, en raison de sa faible densité énergétique, tout en conservant le désavantage majeur du pétrole, à savoir l'impossibilité de capter le CO₂ en sortie de l'émetteur « dispersé » qu'est le véhicule. C'est pourquoi, pour cette énergie, se pose la question du meilleur usage, qui pourrait être la production d'électricité ou le chauffage.

Pour finir, notons une dernière alternative, qui consiste en la transformation du gaz en carburant liquide (*Gas to*

Liquid ou GTL), ce qui permet d'en rendre l'usage plus aisé pour les véhicules automobiles, cet avantage étant obéré par une pénalité quant au bilan CO₂ global ((Ndlr : pour plus de détails sur la production de GTL, voir l'article de Patrick Romeo, dans le présent numéro de *Responsabilité & Environnement*).

Le pétrole non conventionnel, quant à lui, dès lors qu'il conduit aux mêmes produits raffinés, essence ou gazole, n'entraîne pas lui non plus de ruptures technologiques pour un constructeur. Les limites d'usage sont liées au coût et au bilan CO₂ global. Seul le mix gazole-essence reste un enjeu majeur, de par son impact industriel, ses effets induits sur les émissions de CO₂ et les solutions à mettre en œuvre pour respecter la réglementation CO₂. Dans ce contexte, nous nous concentrerons, dans les paragraphes suivants, sur les biocarburants.

Les biocarburants comme source de carburants alternatifs

Ainsi que l'exposent les paragraphes précédents, les carburants liquides ont toujours un bel avenir devant eux en raison de leur forte densité énergétique et de leur facilité de manipulation. Dans ce contexte, les biocarburants apparaissent comme une des sources alternatives complémentaires et matures aux carburants d'origine pétrolière. L'intérêt bien connu des biocarburants de première génération (déjà utilisés) réside dans le fait que le CO₂ émis lors de leur combustion est compensé par le CO₂ équivalent consommé lors du processus de photosynthèse ayant permis la croissance de la plante à l'origine du biocarburant. Le bilan n'est cependant pas simple à réaliser car il impose de comptabiliser non seulement toute l'énergie fossile qu'il a été nécessaire de mobiliser pour produire un litre de

biocarburant (engrais et rejets polluants liés à ces derniers, machines agricoles, procédés de transformation, distribution...), mais aussi de prendre en compte tous les impacts indirects de la culture des plantes, comme les changements d'utilisation des sols, souvent désignés par l'acronyme anglais ILUC (*Indirect Land Use Change*).

Compte tenu de cette complexité, les bilans globaux sont fortement controversés et peu d'études véritablement complètes ont été réalisées à ce jour [3]. Toutefois, la Commission européenne a élaboré des critères encadrant l'usage des biocarburants selon leur bilan global.

La figure 6, issue d'un rapport de l'AIE, rassemble, pour différents types de biocarburants, la réduction observée en termes d'émissions de CO₂. La variabilité pour un même type de biocarburant résulte des conditions de production, de la nature de l'énergie utilisée, etc.

La directive européenne DER (Directive sur les Energies Renouvelables) [4] visant à traiter ces deux problèmes (bilan réel en termes de CO₂, d'une part, et risque de compétition entre cultures énergétiques et alimentaires, d'autre part) impose une feuille de route déclinée pays par pays, avec l'objectif d'utiliser, en 2020, 20 % d'énergie d'origine renouvelable. Pour le transport, cette part est de 10 %, sachant qu'une grande partie de cette énergie renouvelable proviendra des biocarburants. Les biocarburants actuels devront en outre présenter une réduction de CO₂ d'au moins 35 %, pour atteindre progressivement 60 % pour les nouveaux biocarburants entrant sur le marché en 2018. La nouvelle directive concernant la qualité des carburants fait également référence à la définition de critères de durabilité (*sustainability criteria*) pour les biocarburants compatibles du *pool* carburant [5].

Le Brésil a fait des biocarburants un volet central de sa politique énergétique. De même, les Etats-Unis progressent eux aussi vers le bioéthanol, avec une politique évolutif du soutien à la première génération (issue du maïs) vers les voies alternatives utilisant la biomasse (éthanol cellulosique).

Quels ont été les apports de l'industrie automobile dans le domaine des biocarburants ?

Comme tout constructeur est responsable devant son client du bon fonctionnement du véhicule, les constructeurs automobiles européens, en relation avec l'ensemble des parties prenantes (producteurs, industrie pétrolière, distributeurs...), ont évalué les risques liés aux biocarburants et cherché à prendre toutes les précautions techniques nécessaires pour en favoriser l'essor, cela, tout en garantissant une utilisation optimisée des moteurs avec ces nouveaux carburants. En effet, alors que depuis plus de vingt ans les caractéristiques des carburants se sont resserrées pour permettre le développement de moteurs et de systèmes de dépollution de plus en plus sophistiqués, le recours aux biocarburants a introduit une variabilité nouvelle, qui nécessitait d'être précisément encadrée.

Le cas du moteur à essence

L'éthanol est actuellement le seul biocarburant incorporé de façon significative à l'essence (directement, ou sous la forme d'éther éthyl tertiobutyle, ETBE). Il entraîne, à faible teneur, des variations importantes de certaines caractéristiques de l'essence comme sa volatilité, induisant notam-

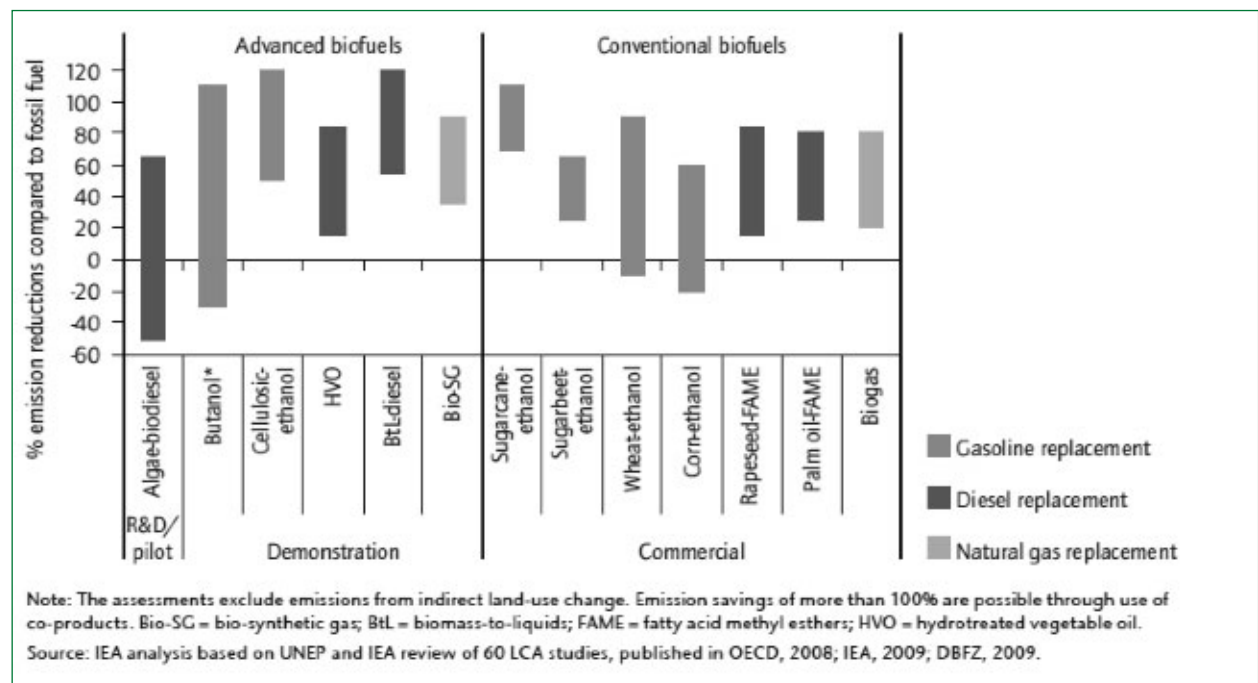


Figure 6 : Roadmap Biocarburants (source AIE, rapport Avril 2011).

ment des risques significatifs de non démarrage ou de calage. Il influe aussi sur la richesse du mélange air/carburant dans la chambre de combustion. En effet, pour obtenir une combustion optimisée, il est nécessaire d'apporter les mêmes quantités stœchiométriques d'air et de carburant. L'éthanol, qui, à la différence de l'essence, contient une grande quantité d'oxygène, déséquilibre cette balance et rend (parmi d'autres inconvénients) les systèmes de dépollution partiellement inefficaces. Heureusement, les moteurs sont dotés de fonctions de correction utilisant notamment des sondes de richesse, qui sont capables, dans une certaine mesure, de corriger ces écarts. Il est communément admis qu'un moteur à essence calibré avec un carburant donné (contenant n'importe quelle teneur en éthanol) fonctionne correctement avec un carburant contenant de plus à moins 10 % d'éthanol (en volume) autour de la teneur du carburant de mise au point.

Avant 2009 et l'avènement de la norme Euro5, les carburants de mise au point des moteurs ne contenaient pas d'éthanol : les moteurs de la grande majorité du parc sont donc compatibles avec la présence de 10 % d'éthanol (E10) si l'ensemble des autres critères exigés par la norme EN 228 régissant la qualité de l'essence sont respectés. Néanmoins, lors de l'introduction en France (fin 2009) du carburant contenant 10 % d'éthanol (SP95 E10), il a été demandé aux constructeurs automobiles de dresser la liste des véhicules compatibles. Les limitations sont venues davantage de l'incompatibilité de certains matériaux de la ligne carburant (polymères sensibles à l'agression de l'éthanol induisant un risque de fuite) que d'éventuels problèmes de combustion. PSA Peugeot Citroën a ainsi autorisé l'utilisation du SP95 E10 pour l'ensemble de ses véhicules produits après 2000.

A noter que l'éthanol est également agressif vis-à-vis de certains grades d'huiles ou encore qu'il peut conduire à l'encrassement du moteur (conduits, injecteurs, chambre...) en raison de la présence d'impuretés inorganiques : une norme EN15376 a ainsi été adoptée, au niveau européen, afin de prémunir les usagers de tels risques.

Les véhicules spécifiques dits *flex-fuels* présentent la capacité de rouler avec des teneurs en éthanol variant de 0 à 85 % d'éthanol en Europe et de 20 à 100 % au Brésil. Ils sont équipés d'un dispositif auto-adaptatif sophistiqué, prenant en compte la quantité réelle d'éthanol dans le réservoir. Le développement de telles motorisations spécifiques est justifié au Brésil, dont la capacité de production d'éthanol permet d'alimenter en E100 une part significative du parc roulant. Mais cela n'est pas le cas en Europe, où l'incorporation d'éthanol à faible teneur (10 %) fait beaucoup plus sens tant sur le plan technique (malgré les restrictions actuelles, environ 60 % du parc est déjà compatible avec l'E10), économique (cela ne nécessite pas de développer une gamme spécifique de moteurs *flex-fuels*, alors même que l'Europe n'a pas la capacité de produire ni de distribuer le carburant E85 en grande quantité) qu'environnemental (l'effet sur la réduction de CO₂ sera plus

rapide à court terme si 60 % du parc consomme dès aujourd'hui de l'E10).

Le cas du moteur diesel

La première génération de biocarburants est constituée d'esters méthyliques d'huile végétale (EMHV), majoritairement issus du colza. Moins stables thermiquement que les gazoles classiques, ces esters peuvent se décomposer partiellement lors du passage à haute température dans le système d'injection directe haute pression (*common rail*) et former des dépôts colmatant le filtre à gazole ou encrassant les buses d'injection (voir la figure 7). Cette forte réactivité s'explique par la présence de doubles liaisons dans la chaîne hydrocarbonée : l'huile de colza, moins insaturée que l'huile de tournesol, conduit, par exemple, à un ester sensiblement plus stable. En revanche, l'emploi d'esters d'huiles fortement saturées n'est pas recommandé : figeant à température modérée, ils entraînent un risque de colmatage en station-service ou sur le circuit carburant du véhicule. C'est d'ailleurs l'une des raisons (avec les risques de corrosion et la viscosité) qui ont conduit à la stricte interdiction par les constructeurs des huiles non estérifiées en tant que carburant véhicule.

Pour se prémunir contre l'ensemble de ces risques, une norme (EN14214) a été prise au niveau européen afin de régir la qualité des EMHV pouvant être utilisés comme biocarburant. Elle est actuellement en cours de révision au CEN afin d'intégrer des critères de stabilité à l'oxydation et de renforcer les propriétés à froid. Elle sera rapidement complétée par une refonte de la norme EN 590 régissant la qualité minimale des carburants Diesel distribués en Europe.

A la demande des constructeurs automobile, la France a, dès la fin 2007, anticipé certaines de ces recommandations pour accompagner la montée progressive de la teneur en biodiesel jusqu'aux 7 % v/v actuels, notamment en imposant une additivation antioxydante dès la production du biocarburant. Cette démarche proactive a conduit le gouvernement français à prendre un décret modifiant l'arrêté modifié du 29 décembre 1999 relatif aux caractéristiques du gazole et du gazole grand froid, ce qui a annulé l'augmentation des pannes du système carburant observées en 2006 et 2007 (voir la figure 8) lors de l'augmentation du taux de biodiesel.

La plus faible résistance à l'oxydation des biocarburants peut également dégrader les propriétés du lubrifiant lorsque ce dernier est dilué du fait de l'injection directe du carburant dans la chambre de combustion. Pour y remédier, l'emploi de grades spécifiques d'huiles devra parfois être recommandé.

C'est pour toutes ces raisons que l'Association des Constructeurs Européens d'Automobile (ACEA) s'est prononcée en faveur d'une incorporation maximale limitée à 7 % en biocarburant de première génération. PSA Peugeot Citroën donne quant à lui sa garantie pour toutes les flottes captives jusqu'à des teneurs de 30 %, moyennant quelques précautions comme l'adoption d'une maintenant-

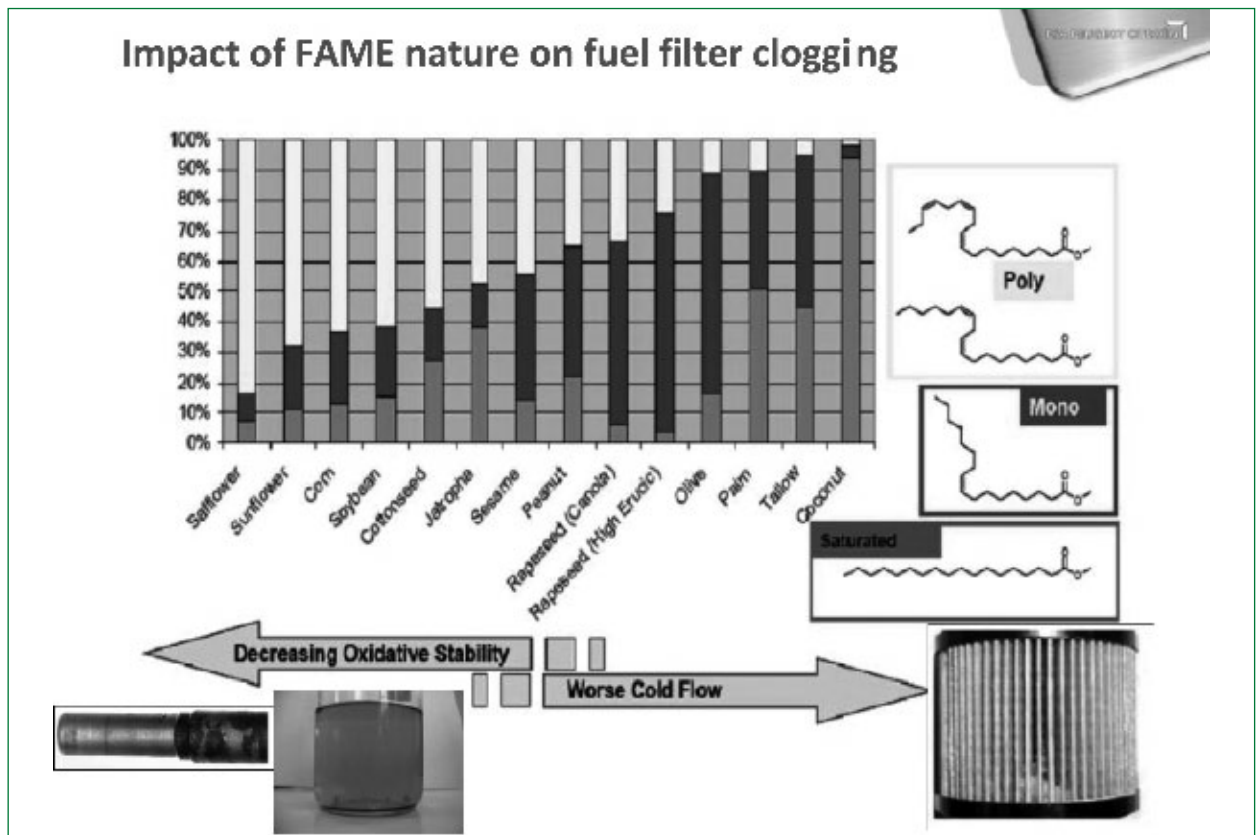


Figure 7 : Influence de la saturation de l'huile végétale sur les propriétés à froid et à chaud des carburants et les risques techniques induits (dépôts, colmatage...).

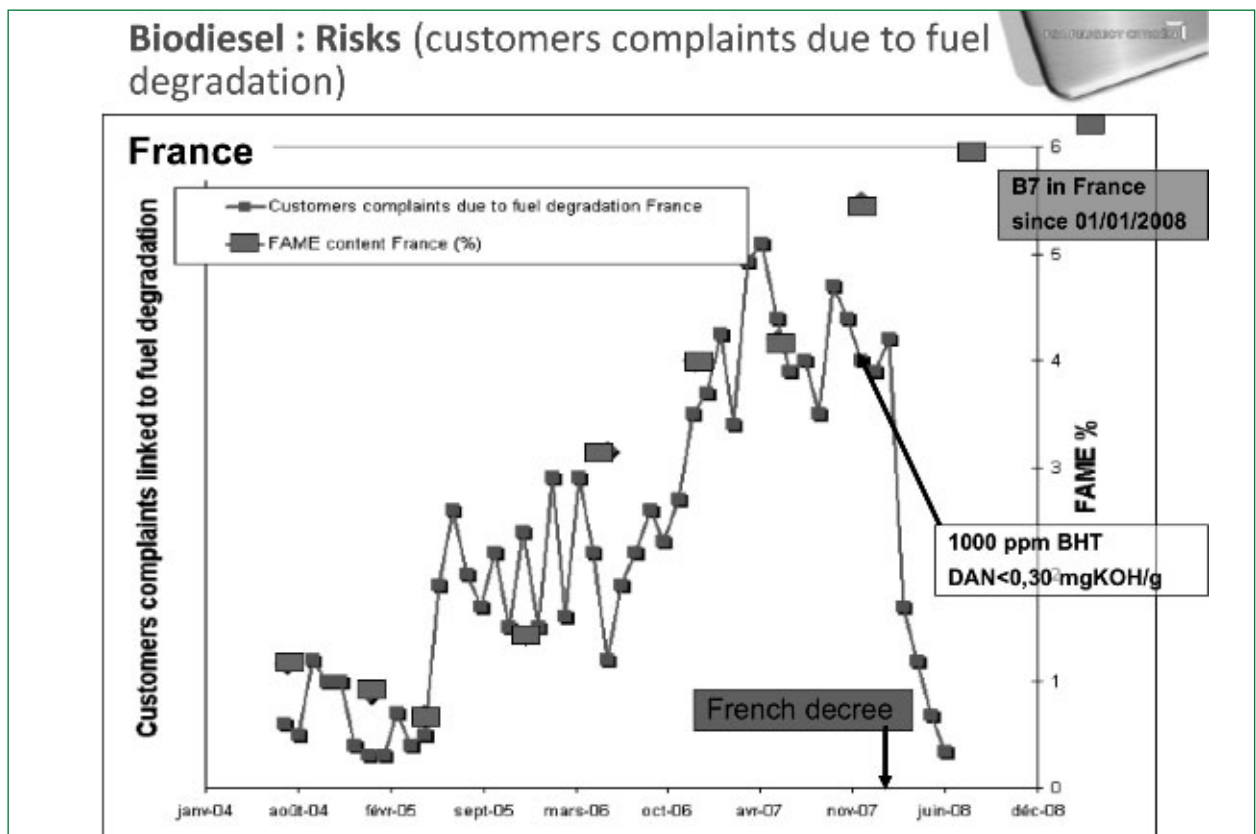


Figure 8 : Impact de l'amélioration de la spécification du carburant (après la prise du décret français) sur les plaintes clients concernant la ligne carburant en fonction de l'augmentation de la teneur en biocarburant en France.

ce renforcée ou l'utilisation de grades d'huiles résistant à l'agression des biocarburants.

A terme, une façon d'éviter tous les problèmes de compatibilité des biodiesels est de « banaliser » les huiles végétales ou animales *via* un traitement de type raffinage conduisant à des molécules proches des carburants classiques, qui peuvent alors être incorporées sans risque au gazole jusqu'à de fortes teneurs. Ces traitements pourraient s'avérer également indispensables pour traiter les huiles, les hydrocarbures ou même la biomasse produits à partir de nouvelles sources comme les micro-algues.

Enfin, certains biocarburants avancés (comme les BTL-*biomass to liquids* - issus d'une synthèse Fisher-Tropsch) ne devraient également poser quasiment aucun problème quant à leur compatibilité avec les moteurs modernes. Le seul frein à leur déploiement est leur rentabilité économique, non encore acquise en raison de procédés de production particulièrement complexes. Ces biocarburants avancés ne devraient cependant pas constituer une part significative des approvisionnements avant 2020/2025.

Conclusion

Les hydrocarbures liquides resteront l'énergie la mieux adaptée à la mobilité individuelle pendant encore de nombreuses années. Le récent rapport de la Commission européenne « Future Transport Fuels » voit même leur part à

plus de 50 % à l'horizon 2050, en incluant le GNL (gaz naturel liquéfié), le GTL (*gas to liquids*) et le GNV (gaz naturel pour véhicules).

Mis bout à bout, les gains possibles en consommation de carburants et en émissions de CO₂ sont techniquement très importants : allègement des véhicules, optimisations énergétiques, rendement des moteurs, hybridation de véhicules.

Le développement des biocarburants à faible taux d'incorporation (moins de 20 %) représente à court terme une source alternative mature et efficace si elle est encadrée par des normes de qualité strictes, permettant la poursuite de l'optimisation des motorisations afin d'en réduire la consommation. Les limites sont celles des volumes disponibles selon les différentes régions du monde. Il ne nécessite pas le développement de technologies automobiles spécifiques, qui seront nécessairement longues et coûteuses à introduire sur le marché, mais le renforcement de la coopération entre constructeurs, pétroliers et producteurs.

Cependant, ce développement n'est pas suffisant. Les trois approches évoquées (optimisation énergétique, carburants alternatifs, électrification à différents niveaux) sont bien complémentaires.

La figure 9 présente l'exemple d'un véhicule moyen haut de gamme, le Peugeot 3008 mû par un moteur Diesel 2,0 l Hdi de 163 ch. Par hybridation, les émissions de CO₂ chutent de 142 g de CO₂/km à 99 g/km, alors même que le

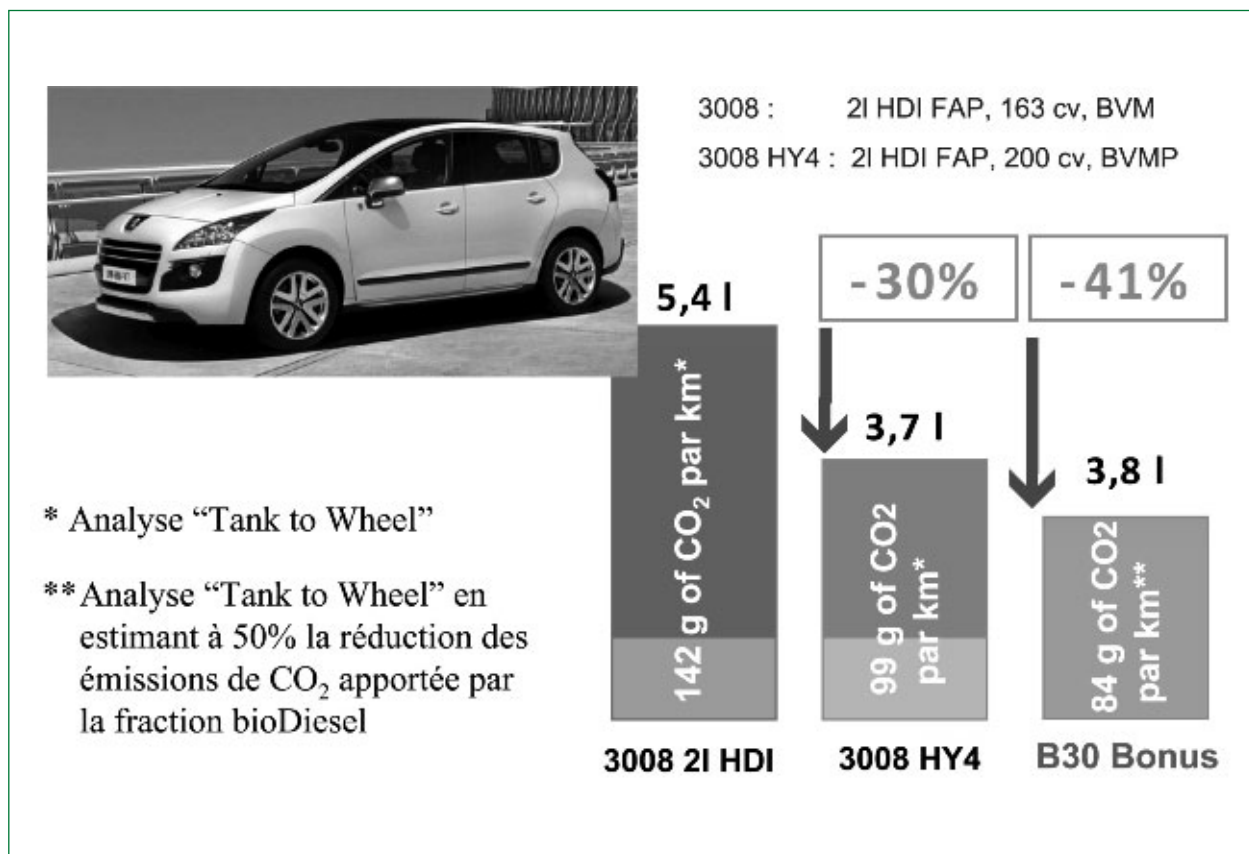


Figure 9 : Additivité des gains liés aux biocarburants et à l'hybridation.

véhicule présente une puissance de 200 cv et une fonctionnalité 4x4 additionnelle (3008 HY4 qui sera commercialisé à la fin 2011). Si le carburant utilisé contient 30% de biodiesel permettant une réduction de 50% des émissions de CO₂ (valeur moyenne communément admise en Europe), alors ce véhicule émet réellement de l'ordre de 84 g/km de CO₂, dans une comparaison du « réservoir à la roue ». Dans une analyse globale du « puits à la roue », les émissions de CO₂ passeraient de 162 g/km à 113 g/km pour l'hybride et à environ 93 g/km pour le véhicule hybride roulant au biodiesel 30%.

A l'horizon 2020-2025, la question qui est posée est celle du mix énergétique et de l'apparition de technologies dédiées à des usages spécifiques. Sans être la fin de la voiture polyvalente, c'est là une sérieuse relativisation de la culture de la polyvalence.

Au-delà, le jeu reste ouvert, notamment selon la manière de produire l'électricité et l'évolution des performances des batteries. Dans tous les cas, le développement de solutions sans hydrocarbures à bord du véhicule impliquera de nouvelles infrastructures et une coopération accrue entre des acteurs de la mobilité de plus en plus nombreux.

Notes

* Directeur des relations institutionnelles, PSA Peugeot Citroën.

** Direction de la recherche et développement, PSA Peugeot Citroën.

(1) Le gaz non conventionnel existe aussi avec le biogaz, qui n'est pas un produit chimiquement différent et n'entraîne donc pas de rupture technologique. De même, d'autres concepts de production de GNV à partir d'électricité renouvelable sont actuellement à l'étude.

Bibliographie

[1] Cabinet Magazine, n°21, printemps 2006.

[2] Règlement européen sur la réduction des émissions de CO₂ des véhicules particuliers (CE) 443/2009.

[3] Etude JEC (CONCAWE/EUCAR/JRC) Version 2C, mars 2007, Bilan Analyse Cycle de Vie ADEME (septembre 2009), IEA Biofuel Roadmap, avril 2011.

[4] Directive sur les énergies renouvelables (Renewable Energy Directive ou RED), 2009/28/EC.

[5] Directive sur la qualité des carburants européens, 2009/30/EC.